

# 高速电弧喷涂 Mo 涂层性能初探

杨忠须<sup>1</sup>, 刘贵民<sup>1</sup>, 徐军<sup>2</sup>, 郭永明<sup>1</sup>

(1. 装甲兵工程学院, 北京 100072; 2. 上海大豪瑞法喷涂机械有限公司, 上海 201708)

**摘要:** **目的** 初步研究高速电弧喷涂 Mo 涂层的综合性能, 为进一步发展热喷涂 Mo 涂层制备工艺提供参考。**方法** 利用高速电弧喷涂设备在 45CrNiMoVA 钢表面制备 Mo 涂层, 采用场发射扫描电镜、X 射线能谱仪、显微硬度测试仪及电子万能试验机等对涂层形貌、成分、显微硬度及结合强度进行表征和测试, 并结合断口微观形貌对拉伸断裂机理进行分析。采用 CETR-3 型多功能摩擦磨损试验机, 在润滑条件下对涂层进行不同载荷的摩擦磨损实验, 通过磨损体积及表面磨痕微观形貌分析涂层的摩擦磨损性能及机理。**结果** Mo 涂层具有一定的微观孔隙, 氧化物含量低, 与基体结合牢固可靠, 平均显微硬度高达 416.3HV0.1, 平均内聚强度为 22.7 MPa。拉伸断口呈脆性断裂, 并伴有半熔融颗粒剥落留下的剥落坑。润滑条件下, 涂层在 10, 30, 50 N 载荷下的磨损体积分别为  $1.1 \times 10^7$ ,  $4.4 \times 10^7$ ,  $5.5 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ 。**结论** 高速电弧喷涂可成功制备 Mo 涂层, 涂层与基体为机械结合。在润滑条件下, 涂层的磨损体积随载荷增大而增大, 不同载荷下的磨损机理均以粘着磨损为主。

**关键词:** Mo 涂层; 高速电弧喷涂; 微观形貌; 显微硬度; 内聚强度; 摩擦磨损

**中图分类号:** TG174.442

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1001-3660(2015)06-0032-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.06.007

## Study on the Properties of Mo Coating Prepared by High Velocity Arc Spraying

YANG Zhong-xu<sup>1</sup>, LIU Gui-min<sup>1</sup>, XU Jun<sup>2</sup>, GUO Yong-ming<sup>1</sup>

(1. Academy of Armoured Forces Engineering, Beijing 100072, China;

2. Shanghai Dahao Ruifa Thermal Spray Machinery Co., Ltd, Shanghai 201708, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To study the comprehensive properties of Mo coating prepared by high velocity arc spraying, so as to provide some referential value for Mo coating preparation technology. **Methods** The Mo coatings were prepared on the surface of 45CrNiMoVA steel by the high velocity arc spraying device, tests include microstructure, components, microhardness, bonding-strength were performed by SEM, XRD, micro-hardness test, electromechanical universal testing machine, and the fracture mechanism was analyzed through the micro-structure of fracture surface. The lubricative tribological properties under different loads of coating were tested by the CETR-3 multifunctional friction and wear testing machine. The friction properties and wear mechanism

收稿日期: 2015-01-22; 修订日期: 2015-03-04

Received: 2015-01-22; Revised: 2015-03-04

基金项目: 北京市自然科学基金(2152031); 再制造技术重点实验室基金(9140C8502010C85)

Fund: Supported by Beijing Natural Science Foundation(2152031) and the Project of State Key Laboratory of Remanufacturing (9140C8502010C85)

作者简介: 杨忠须(1990—), 男, 湖南人, 硕士研究生, 主要研究表面涂层材料。

Biography: YANG Zhong-xu(1990—), Male, from Hunan, Master graduate student, Research focus: coatings materials.

通讯作者: 刘贵民(1971—), 男, 山东人, 博士, 教授, 主要从事材料失效及铜基复合材料的研究。

Corresponding author: LIU Gui-min(1971—), Male, from Shandong, Doctor, Professor, Research focus: materials failure & Cu-based composite materials.

were characterized through the wear volume and worn surface. **Results** The Mo coating presented a certain amount of micro-pores and low content of oxides, the bonding of coating and matrix is reliable without cracks and pores, the average microhardness is 416.3 HV0.1, the average cohesive strength is 22.7 MPa. The tensile fracture surface showed brittle fracture accompanied with some pits resulted by partial melted particles, and the wear volume were  $1.1 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ ,  $4.4 \times 10^7 \mu\text{m}^3$  and  $5.5 \times 10^7 \mu\text{m}^3$  when under the load of 10 N, 30N and 50 N, respectively. **Conclusion** Mo coating can be successfully prepared by high velocity arc spraying, the bonding mechanism of coating and matrix is mechanical joint. The lubricative wear test showed that wear volume was increased with the rise of load, and the wear mechanism under different loadings was mainly adhesive wear.

**KEY WORDS:** Mo coating; high velocity arc spraying; micro-structure; micro-hardness; cohesive strength; friction and wear

Mo 是贵重的稀有金属,具有熔点高(2630 ℃),硬度高,耐磨性好,抗腐蚀,抗粘结,耐熔融铜、铁等优良性能,低膨胀系数和高导热率赋予其优异的抗热冲击性能。利用 Mo 作为热喷涂原料,将其喷涂于零部件表面,可以达到提升性能、修复尺寸和延长服役寿命的目的,近年来在汽车机械、石油化工、航空航天、军工装备等领域已取得广泛应用<sup>[1-4]</sup>。

目前,热喷涂 Mo 涂层的制备工艺主要为火焰喷涂及等离子喷涂,尤以等离子喷涂的研究居多,也有部分学者对电热爆炸喷涂制备的 Mo 涂层性能进行了探索<sup>[5-8]</sup>,但有关电弧喷涂制备 Mo 涂层的研究,国内未见有文献报道,国外的研究报道也很少见,涉及到的电弧喷涂 Mo 也仅是对比不同涂层的性能。Zai-chowski 等人<sup>[9]</sup>曾指出,电弧喷涂 Mo 涂层与等离子喷涂 Mo 涂层的微观结构相似,涂层层间氧化物含量均较少,而高速电弧喷涂的 Mo 涂层因为更加致密,所以拥有更高的微观硬度。Naimi 等人<sup>[10]</sup>在 7075-T6 铝合金表面分别电弧喷涂 Mo 及 Al 涂层,微观形貌分析及耐腐蚀试验结果显示:Mo 涂层虽然具有更高的微观硬度,但孔隙较多,层间结合强度较差,抛光阶段易出现剥落现象;此外,Mo 涂层使基体腐蚀电位转为阳极,但提高了腐蚀电流。

电弧喷涂是采用电弧熔化金属丝,利用压缩气流将雾化的金属熔融粒子喷射至工件表面,从而形成涂层的工艺。高速电弧喷涂则是基于空气动力学原理,采用改进型喷管设计及高压气体提升粒子飞行速度,以获得沉积效率更高、致密性更好的涂层。与其他热喷涂技术相比,电弧喷涂的优势在于稳定性好,经济性好,通用性强,并且随着操作机及机器人自动电弧喷涂系统的深入发展,电弧喷涂自动化程度将越来越高<sup>[11-13]</sup>。基于此,文中采用高速电弧喷涂设备制备 Mo 涂层,并对涂层的微观形貌、显微硬度、结合强度及摩擦磨损性能进行了研究,拟为拓展热喷涂 Mo 涂层制备工艺提供一定的参考。

## 1 实验

### 1.1 喷涂 Mo 涂层

选用  $\phi 2.0 \text{ mm}$  的 Mo 丝(北京索通钨钼科技有限公司生产)为喷涂材料,纯度  $\geq 99.95\%$ 。基体材料为  $\phi 25.4 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 45CrNiMoVA 钢,具有比强度高、硬度高、耐磨损的优点。其热处理机制为:860 ~ 880 ℃ 淬火,420 ~ 440 ℃ 回火。其化学成分(以质量分数计)为: C 5.66%, Ni 1.33%, Cr 1.04%, Mo 6.14%, Mn 1.55%, Si 0.66%, Fe 84.02%。力学性能如下:  $\sigma_b = 1530 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_s = 1460 \text{ MPa}$ ,  $\delta = 13\%$ ,  $akv = 48.8 \text{ J/cm}^2$ , 硬度为 443HB,  $\varphi = 47\%$ 。

基体材料经除锈去污后,用 24 目棕刚玉进行喷砂粗化,再用丙酮液超声清洗,干燥。采用 QD10-D-400 型高速电弧喷涂设备(上海大豪瑞法喷涂机械有限公司生产)进行喷涂,涂层厚度控制在 0.4 mm 左右。该设备配备拉式喷枪及 QD8-S 型送丝机,具有操作简便、性能稳定、电源与控制系统一体等特点。具体喷涂参数为:喷涂距离 150 mm,电压 35 V,电流 180 A,气体压力 0.65 MPa,送丝速率 4 m/min。

### 1.2 测试方法

采用 Nova NonoSEM50 场发射扫描电镜对涂层表面及截面微观形貌进行表征。涂层成分检测采用 Genesis 型 X 射线能谱仪。所有被检测试样严格依据金相制备工艺要求进行研磨抛光。

依据 GB/T 8642—2002《热喷涂 抗拉结合强度的测定》,采用胶结拉伸法测量涂层与基体的结合强度。粘接剂选用 E7 胶,保证试样与对偶件对心粘接,于 120 ℃ 保温 3 h 进行固化处理。采用 CMT4304 微机控制电子万能试验机进行拉伸,加载速率为 0.05 N/s,取 3 组拉伸结果的平均值。

采用 MICROMET-6030 型显微硬度仪测定涂层与

基体的显微硬度,载荷 100 g,加载时间 10 s,取 10 个不同位置点测量值的平均值。

采用 CETR-3 型多功能摩擦磨损试验机进行润滑条件下的摩擦磨损实验。对磨形式为球盘式,对磨件选用  $\phi 4\text{ mm}$  的氧化锆小球,润滑油选用适用于重负荷往复式空气压缩机的润滑油。其他摩擦条件为:频率 10 Hz,载荷 10,30,50 N,摩擦时间 30 min,单次行程 4 mm。实验前,涂层表面需研磨抛光至  $Ra \leq 0.8\text{ }\mu\text{m}$ ,以避免粗糙带来的影响。采用 VK-9700K 型 3D 激光高精度三维形貌测试仪测量磨损体积,取 3 次测量的平均值。

2 结果与讨论

2.1 涂层的微观形貌及组织

图 1 为涂层表面形貌。如图 1a 所示,涂层表面整体较为粗糙,可基本分为由半熔融粒子搭接而成的粗糙区(A)和完全熔融粒子撞击铺展后形成的光滑区(B)。粗糙区放大后可见,半熔融粒子较多,尽管也存在完全熔融粒子铺展填满粒子间隙的现象,但是由于数量较少,粒子间隙依然存在,且较为明显,见图 1b。光滑区的放大图像中,以完全熔融粒子高速撞击、铺展良好并急速冷却凝固后的“饼状”层片为主,

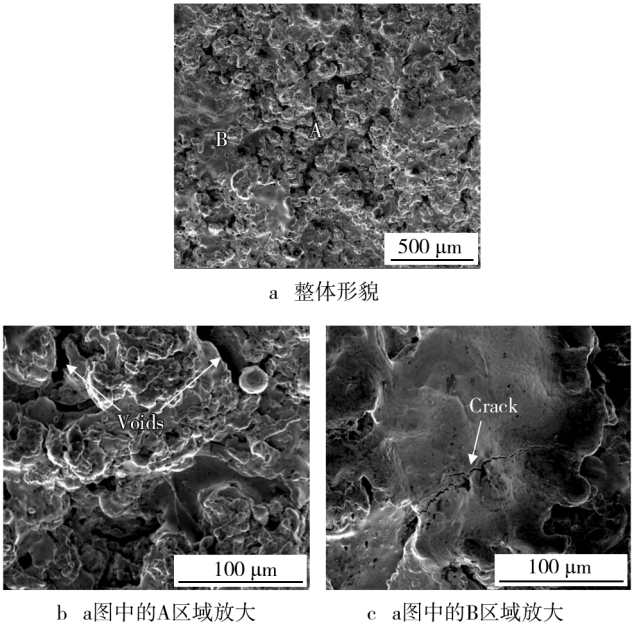


图 1 Mo 涂层表面 SEM 形貌

Fig. 1 Surface SEM micrograph of Mo coating: a) entirety; b) enlargement of area A in fig. 1a; c) enlargement of area B in fig. 1a

“饼状”层片表面可见一条几乎贯穿整个层片的明显裂纹(见图 1c)。分析裂纹产生的原因有两个方面:一是完全熔融粒子在撞击铺展前,该部位存在孔隙,铺展过程中,层片中心因惯性力向孔隙内凹陷,凹陷时因层片边缘的粘滞作用而受力产生裂纹;二是急速骤冷时产生的热应力所致<sup>[14—15]</sup>。

图 2 为涂层截面微观形貌,经测试,涂层平均厚度为 0.44 mm。由图 2a 可见,涂层存在较多微孔隙,致密性较差,但未见粗大裂纹及大的孔隙。涂层存在数量较多的微孔隙说明喷涂参数有待进一步优化。孔隙形成的机制与半熔融粒子的不完全重叠、气体的卷入及急速冷却时的凝固收缩有关。涂层表面较为粗糙,半熔融粒子较多,也进一步证明了喷涂过程中粒子撞击扁平化及粒子间搭接效果较差,后续的参数调节应适当提高喷涂功率及雾化气压,以提升粒子熔融程度及飞行撞击动能。涂层与基体结合处放大后如图 2b 所示,可见涂层与基体结合良好,无缝隙及裂纹的出现。结合 EDS 线扫描分析(图 3)可知,往基体方向,Mo 元素含量在结合处发生骤降,基体内的 Mo 含量很少,同时向涂层内扩散的 Fe 元素也很少,二者未发生明显的相互扩散。因而可以推断,涂层与基体的结合方式为机械结合。高速电弧喷涂时,高速飞行

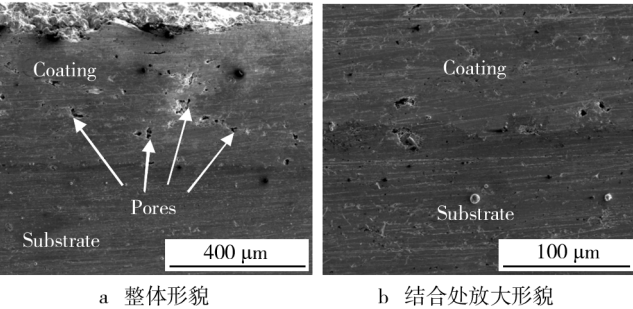


图 2 Mo 涂层截面形貌

Fig. 2 Cross-sectional SEM micrograph of Mo coating: a) entirety; b) enlargement of the interface

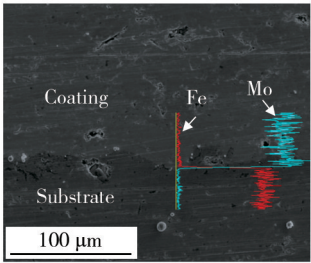


图 3 涂层与基体结合处线扫描元素分布

Fig. 3 Elements distribution between the interface of coating and substrate



的熔融及半熔融粒子撞击经预处理粗化的基体表面后,迅速铺展成扁平状的液态金属薄片紧贴于基体表面的凹凸点,冷凝收缩后咬住凸点,从而形成牢固可靠的机械结合<sup>[16]</sup>。

图 4 为 Mo 丝及高速电弧喷涂 Mo 涂层的 XRD 图谱对比。由图 4 可见,Mo 涂层存在氧化现象,含有极少量的 MoO<sub>2</sub> 和 MoO<sub>3</sub>。一般的电弧喷涂易发生较多的氧化<sup>[17]</sup>,高速电弧喷涂的雾化气流速度可达到 1 ~ 2 Ma,高速的射流能够极大地缩短粒子飞行时间,从而避免过多的氧化<sup>[18]</sup>。另外,MoO<sub>2</sub> 在高温下会迅速氧化为升华温度仅 700 ℃ 的 MoO<sub>3</sub>,MoO<sub>3</sub> 的大量挥发也是涂层氧化物含量低的原因之一。

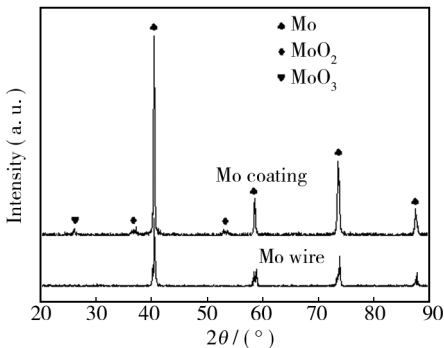


图 4 Mo 涂层与 Mo 丝的 XRD 图谱

Fig. 4 XRD patterns of Mo coating and Mo wire

2.2 涂层的显微硬度及结合强度

图 5 为显微硬度测试结果。由图 5 可见,涂层显微硬度值的起伏大,最高值高达 636HV0.1,最低值仅为 337HV0.1,这与涂层致密性和氧化有着密切的关系。涂层微孔隙较多,孔隙部位的硬度较低,而含有硬质氧化相的致密部位的硬度则相对偏高<sup>[19]</sup>。经计算,基体材料的平均显微硬度值为 245.4HV0.1,涂层的平均显微硬度值为 416.3HV0.1,后者比前者提高了近 70%。

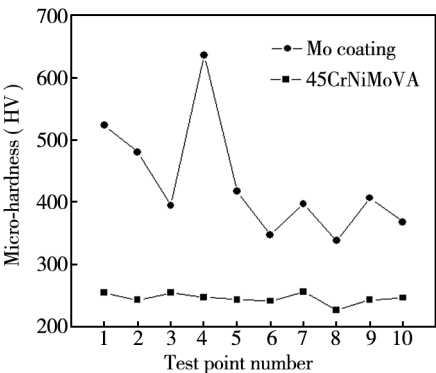


图 5 显微硬度测试结果

Fig. 5 Results of micro-hardness test

经结合强度测试,3 组试样的测试值分别为 24, 26, 18 MPa。涂层均为层间断裂失效,即测试的结合强度值均为涂层内聚强度。涂层的平均内聚强度并不高,仅为 22.7 MPa。分析表明,涂层与基体的结合强度高于 22.7 MPa<sup>[20]</sup>。

结合强度测试过程中,随着两端拉伸力的增大,涂层内部微孔隙尖角处将率先萌生裂纹,裂纹伴随拉伸力的增大而不断扩展交割,当达到临界值时则出现涂层断裂失效。图 6 为涂层拉伸断口的微观形貌。如图 6a 所示,涂层断口显得十分光亮、平滑,粗糙度较小,未见任何塑性变形断裂后留下的凸起,因而可以推断涂层的拉伸断裂失效模式为脆性断裂。放大后的图像显示,存在涂层层状剥离后留下的脆性撕裂台阶及裂痕(见图 6b),以及被熔融粒子包裹的半熔融粒子剥离后留下的剥落坑和周边清晰可见的放射性裂纹(见图 6c)。Mo 涂层的硬度很高,塑性较差,扁平化后的 Mo 层片相互挤压搭接,拉伸过程中萌生出的裂纹将沿着搭接结合处迅速扩展,加上 Mo 层片本身固有的裂纹,涂层内部最终因裂纹贯穿而出现大层片的脆性剥落失效。出现放射性裂纹是由于半熔融粒子拉伸剥离时,其周边的裂纹放射性向外扩展所致。

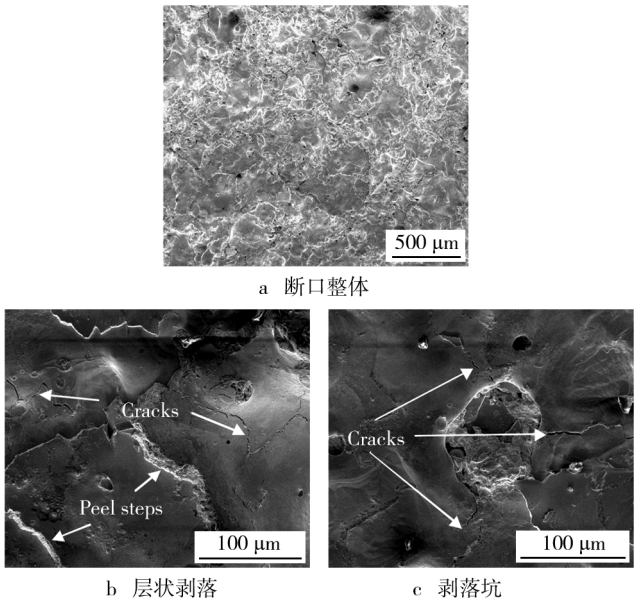


图 6 涂层拉伸断口形貌

Fig. 6 Tensile fracture SEM micrograph of Mo coating: a) entirety; b) layer peeling; c) pit

2.3 涂层的摩擦磨损性能

图 7 为涂层在不同载荷下,摩擦因数随时间的变化曲线。可以看出,10 N 载荷下,涂层摩擦因数波动较大,在摩擦磨损前期上升,5 min 左右出现骤降,之

后又迅速上升,15 min 后以 0.01 左右的振幅在 0.25 附近震荡变化,但在摩擦磨损结束前似乎开始呈下降趋势。载荷增加至 30 N 时,摩擦因数整体较低且较为平稳,前期基本稳定在 0.14 左右,17 min 附近出现小幅升高,之后又迅速稳定在 0.15 左右。载荷增加至 50 N 时,摩擦因数经 1 min 后迅速升高至 0.17 左右,后期则基本稳定在 0.18 左右。三种载荷下,涂层平均摩擦因数分别为 0.230,0.149,0.175。

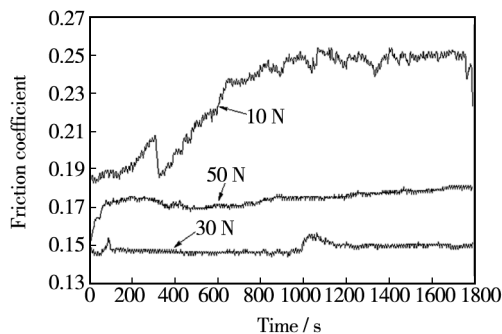
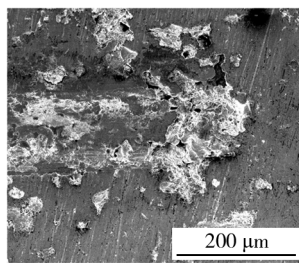


图7 不同载荷下涂层摩擦因数曲线

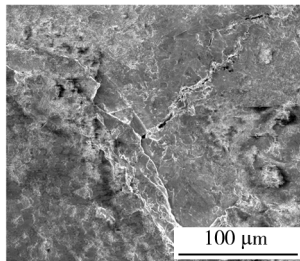
Fig.7 Friction coefficient curves of Mo coating under different loads

经测试,10 N 载荷下的涂层磨损体积仅为  $1.1 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ ;30 N 载荷下的磨损体积为  $4.4 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ ,为 10 N 下的 4 倍;50 N 载荷下的磨损体积为  $5.5 \times 10^7 \mu\text{m}^3$ 。可见涂层磨损体积随载荷的增大而增加,并且载荷较大时,涂层磨损体积增加幅度变小。

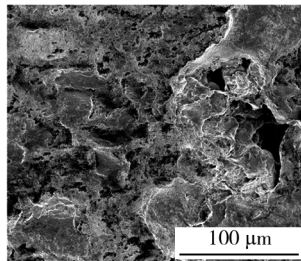
图 8 为不同载荷下,涂层经摩擦磨损后的表面微观形貌。由图 8a 可以看出,10 N 载荷下,涂层磨痕较为粗糙,且有轻微的犁沟,中间部位存在与粘着磨损机理相符的材料剥落,剥落后的层片因润滑油的粘滞作用无法及时排出,堆积在磨痕尾部的孔隙内(EDS 分析发现存在氧化)。磨损机理为粘着磨损、氧化磨损及轻微的磨粒磨损。往复式的运动方式使得摩擦界面的磨粒数量频繁变化,因而摩擦因数呈震荡起伏,5 min 左右的摩擦因数骤降与涂层内孔隙被剥落的材料填满有关;摩擦因数最后呈下降趋势可能是孔隙周边的氧化物被带入摩擦界面,生成氧化保护膜所致。平均摩擦因数相对较高是因为不断剥离的 Mo 层片起到了增大摩擦力的作用。载荷增大到 30 N 时,涂层层片剥落的台阶被迅速磨平(如图 8b 所示),为润滑膜和氧化保护膜的生成提供了良好的条件,因而平均摩擦因数最低。循环往复的压应力使涂层孔隙内的润滑油膨胀溢出,孔隙内裂纹迅速萌生扩展,导致新的层片剥落,因而在 17 min 左右摩擦因数出现



a 10 N



b 30 N



c 50 N

图8 不同载荷下的涂层磨痕形貌

Fig.8 Worn surface SEM micrograph of Mo coating under different loads

了短暂的上升。涂层磨损机理为粘着磨损及轻微氧化磨损。当载荷增大到 50 N 时,涂层磨损表面呈黑色黏稠状(如图 8c 所示),EDS 分析证实此处氧含量较高,因而可推断孔隙内空气与 Mo 发生了氧化反应,50 N 的大载荷导致摩擦表面部分润滑膜和氧化膜被破坏,涂层磨损机理为严重的氧化磨损及粘着磨损,因而平均摩擦因数略高,磨损体积最大<sup>[21]</sup>。

### 3 结论

- 1) 利用高速电弧喷涂成功制备了 Mo 涂层。涂层无粗大孔隙及裂纹,但存在较多的微孔隙,氧化程度较低,与基体结合牢固可靠,结合方式为机械结合。
- 2) 涂层平均显微硬度为 416.3HV0.1,相对基体提高了近 70%。涂层平均内聚强度为 22.7 MPa,拉伸失效断口呈脆性断裂。
- 3) 润滑条件下,涂层磨损体积随载荷增大而增大。不同载荷下,涂层的磨损机理均以粘着磨损为主。

### 参考文献

- [1] 严淑群. 钼系涂层的制备工艺研究[J]. 湖南冶金, 2001 (2): 16—19.  
YAN Shu-qun. Study of Technology for Mo-base Coat[J]. Hunan Metallurgy, 2001 (2): 16—19.
- [2] 姜超平, 陈宏, 郝建民. 等离子喷涂钼的氧化行为与性能

- 分析[J]. 铸造技术, 2009, 30(7): 915—917.
- JIANG Chao-ping, CHEN Hong, HAO Jian-min. Property and Oxidize Behavior of Thermal Spraying Mo Coating[J]. Foundry Technology, 2009, 30(7): 915—917.
- [3] 夏光明, 严淑群, 闵小兵, 等. 制备同步环涂层工艺的研究及性能检测[J]. 表面技术, 2001, 30(2): 12—16.
- XIA Guang-ming, YAN Shu-qun, MIN Xiao-bing, et al. Technical Study and Performance Test of Coating on Synchr Ring[J]. Surface Technology, 2001, 30(2): 12—16.
- [4] VAIDYA A, STREIBL T, LI L, et al. An Integrated Study of Thermal Spray Process-Structure-Property Correlation: A Case Study For Plasma Sprayed Molybdenum Coatings[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 403: 191—204.
- [5] LARIBI M, VANNES A B, TREHEUX D. Study of Mechanical Behavior of Molybdenum Coating Using Sliding Wear and Impact Tests[J]. Wear, 2007, 225(2): 1131—1140.
- [6] MANJUNATHA S S, BASAVARAJAPPA S. Effect of Powder Particle Size on Wear Resistance of Plasma Sprayed Molybdenum Coating[J]. Journal of Engineering Tribology, 2014, 228(7): 789—796.
- [7] 朱亮, 赵进峰. 孔内表面丝电爆炸喷涂钼涂层的组织结构和性能[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(6): 1—5.
- ZHU Liang, ZHAO Jin-feng. Structure and Performance of Molybdenum Coating with Wire Electrical Explosion Spraying on Inner Surface of Hole[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(6): 1—5.
- [8] 刘加健. 电热爆炸喷涂钼涂层的制备及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2012.
- LIU Jia-jian. Preparation and Properties of Electro-Thermal Sprayed Mo Coating[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2012.
- [9] ZAJCHOWSKI P, CRAPO H B. Evaluation of Three Dual-wire Electric Arc-sprayed Coatings: Industrial Note[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 1996, 5(4): 457—461.
- [10] NAIMI A, YOUSFI H, TRARI M. Microstructure and Corrosion Resistance of Molybdenum and Aluminum Coatings Thermally Sprayed on 7075-T6 Aluminum Alloy[J]. Physicochemical Problems of Materials Protection, 2012, 48(5): 557—562.
- [11] 陈永雄, 徐滨士, 许一, 等. 高速电弧喷涂在装备维修与再制造工程领域的研究应用现状[J]. 中国表面工程, 2006, 19(5): 169—172.
- CHEN Yong-xiong, XU Bin-shi, XU Yi, et al. Process in Applying HVAS technology to Maintenance & Remanufacture Engineering[J]. China Surface Engineering, 2006, 19(5): 169—172.
- [12] LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, ZHANG Zhi-bin, et al. Research on Automatic High Velocity Arc Spraying Technology and Metastable Coating Materials[J]. Advance in Manufacturing, 2013, 1(1): 97—101.
- [13] 田浩亮, 魏世丞, 程永雄, 等. 高速电弧喷涂在工程机械零部件再制造领域中的应用现状[J]. 表面技术, 2013, 42(3): 99—102.
- TIAN Hao-liang, WEI Shi-cheng, CHENG Yong-xiong, et al. Application Status of High Velocity Arc Spraying Technology in Remanufacturing Construction Machinery Parts[J]. Surface Technology, 2013, 42(3): 99—102.
- [14] 王海斗, 徐滨士, 姜祎, 等. 超音速等离子喷涂涂层的组织及性能分析[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 1—4.
- WANG Hai-dou, XU Bin-shi, JIANG Hui, et al. Microstructure and Mechanical Properties of Supersonic Plasma Sprayed Coating[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 1—4.
- [15] MCDONAD A, LAMONTAGNE M, CHANDRE S, et al. Photographing Impact of Plasma-sprayed Particles on Metal Substrates[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, 15(4): 708—715.
- [16] 徐维普, 徐滨士, 张伟. 高速电弧喷涂涂层的结合强度与结合方式研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(7): 62—64.
- XU Wei-pu, XU Bin-shi, ZHANG Wei. Research of Bonding Strength and Type of High Velocity Arc Sprayed Coatings[J]. 热加工工艺, 2007, 36(7): 62—64.
- [17] 陈永雄, 梁秀兵, 刘燕, 等. 电弧喷涂快速成形技术研究现状[J]. 材料工程, 2010(2): 91—96.
- CHEN Yong-xiong, LIANG Xiu-bing, LIU Yan, et al. Development of Electric Arc Spray Forming Technology[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(2): 91—96.
- [18] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- XU Bin-shi, ZHU Shao-hua. Theories and Technologies on Surface Engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [19] 欧献, 邓畅光, 王日初, 等. 超音速等离子喷涂工艺参数对  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  涂层硬度的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 81—85.
- OU Xian, DENG Chang-guang, WANG Ri-chu, et al. Influence of the Supersonic Plasma Spraying Process on the Hardness Properties of  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 81—85.
- [20] 张平. 热喷涂材料[M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- ZHANG Ping. Thermal Spray Materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006.
- [21] 布尚·B. 摩擦学导论[M]. 葛世荣, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- BUSHAN Bharat. Introduction to Tribology[M]. GE Shi-rong, Translated. Beijing: China Machine Press, 2006.